

600W급 Consequent Pole Type IPMSM 설계 및 특성 비교

The Design and Characteristics Comparison of 600W Class Consequent Pole Type IPMSM

김 규 화* · 박 병 준** · 김 용 태*** · 김 규 탁*

(Gyu-Hwa Gim · Byung-Jun Park · Yongn-Tae Kim · Gyu-Tak KimJang)

Abstract - The Permanent Magnet Synchronous Motor(PMSM) has various advantages. However, new types of research have been carried out because of rising prices of materials for rare earth magnets used in PMSM and also unstable supply. In this paper, we propose Consequent Pole(CP) type IPMSM for magnet reduction. The shape of CP type IPMSM stator was same with Basic model IPMSM. The design of the rotor shape was proceeded that CP type IPMSM achieved the same output as the basic model IPMSM. Finally, the selected model and IPMSM were compared and discussed.

Key Words : IPMSM, Consequent pole, Permanent magnet reduction

1. 서 론

영구자석 동기 전동기(PMSM)은 고효율, 넓은 속도 범위에서 제어가 용이한 장점을 가지고 있다. 따라서 고 에너지 밀도를 갖는 영구자석을 사용하는 전동기의 응용분야가 넓어지고 있다[1]. 특히, 전 세계적으로 화석연료의 연소로 인한 CO₂ 배출량 절감 및 석유 등의 에너지 자원 고갈 대책으로 자동차에 대한 에너지 이용 효율의 향상, 즉 연비 향상에 대한 요구가 해마다 높아지고 있으며, 그 해결책의 하나로 주목 받고 있는 하이브리드 자동차(HEV)와 전기자동차(EV)로 전 세계에 보급되고 있는 실정이다. 이에 따라 영구자석 동기전동기는 HEV 및 EV의 구동 시스템에서 중요한 역할을 하고 있다[2].

그러나, PMSM에 사용되는 희토류 자석의 원재료인 네오디뮴(Neodymium) 과 디스프로슘(Dysprosium) 등의 희토류 원소, 희토류는 세계 생산량의 90% 이상을 중국이 보유하고 있어 매우 심한 편재성을 띠며, 가격 상승 및 수출규제 강화로 인해 공급의 불안정화가 이어지고 있다. 이에 따라, 희토류 자석을 사용하지 않거나 자석 사용량을 줄이는 여러 연구들 또한 활발히 진행되어 왔다[2-3].

여러 연구들 중 Consequent Pole (CP) type PMSM전동기는 회전자 자석 쌍극 중 한 극만 사용하며, 자속경로를 생성하기 위

해 자석 대신 철심을 이용한다. 이에 동일 출력 대비 자석 사용량의 저감이 가능하다. 그러나 자기적 불평형이 발생하게 되므로 자기회로를 효율적으로 설계하여야 한다. 많은 연구들이 진행되어왔지만 주로 표면부착형 또는 외전형 전동기의 형태를 가진다. 또한 극수가 많은 다극으로 이는 제작 및 제어의 어려움으로 전체 시스템의 가격 상승을 야기할 수 있다[4-6].

본 논문에서는 자석 저감을 위해 CP type IPMSM을 제안한다. 8극 12슬롯의 기본모델 IPMSM과 동일한 출력을 얻는 CP type IPMSM을 설계한다. 고정자의 경우 기본모델의 형상과 동일하게 하고, 회전자 형상의 설계를 진행한다. 자석의 크기에 따른 설계를 우선적으로 진행한다. 이 때, 영구자석의 저감률을 35% 이상을 목표로 하여, 제한된 자석의 면적을 적용하여 해석을 수행한다. 그리고 자속 집중 방식의 V-type 분할 자석을 적용하고, 토크리플 저감을 위한 회전자 Arc를 적용한다. 최종적으로 토크 증가 설계를 위한 배리어(Barrier) 형상 설계를 진행, 최종적으로 선정된 CP type IPMSM모델과 IPMSM 기본모델과 특성 비교 및 고찰한다.

2. 본 론

2.1 IPMSM 기본모델

본 논문에서 적용된 600W급 IPMSM 기본모델의 자속선과 자속 밀도 분포도는 그림 1과 같다. 8극 12슬롯의 일반적인 형태를 가지고 있다. 이 모델에 대한 특성을 표 1에 정리하였으며, CP type과의 비교를 위해, 인가 전류를 25[Arms]로 고정하고 해석을 수행하였다.

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Changwon National University, Korea.

E-mail : gtkim@changwon.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Changwon National University, Korea.

** Park Byung-Jun Electric Lab, Korea.

***Motor R&D Center, S&T Motiv, Korea.

Received : March 15, 2018; Accepted : July 9, 2018

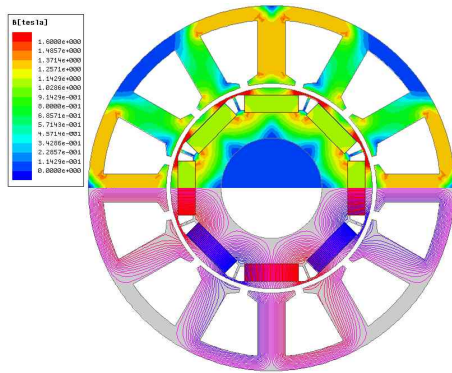


그림 1 논문에 적용된 기본모델의 자속선과 자속밀도분포도
Fig. 1 Flux lines and flux density distribution of basic model applied in this paper

표 1 기본모델 해석결과 및 특성

Table 1 The analysis results and characteristics of Basic model

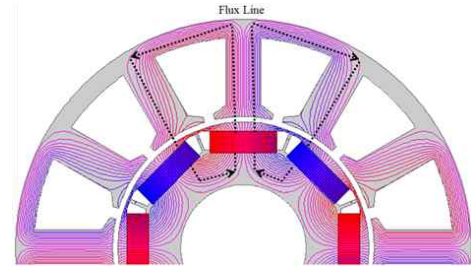
Items	IPMSM
자석 사용 단면적 [mm ²]	396.8
역기전력 [Vrms]	8.26
코깁토크 [mNm]	299.2
인가전류 [Arms]	25
정격 속도 [rpm]	3,000
정격 토크 [Nm]	1.91
토크 리플 [%]	15.8
동손 [W]	28.99
철손 [W]	28.93
기계손 [W]	17.15
총 손실 [W]	75.07
출력 [W]	600
효율 [%]	88.9

2.2 Consequent Pole(CP) type IPMSM

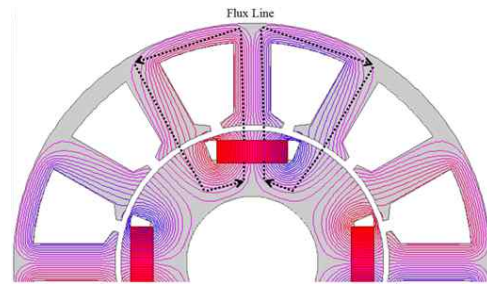
Consequent Pole (CP) type IPMSM의 개념은 그림 2를 통해 설명한다. CP type PMSM전동기는 그림 2의 (b)와 같이 회전자 자석 쌍극 중 한 극만 사용하며, 자속경로를 생성하기 위해 자석 대신 철심을 이용한다. 일반적으로 자석은 비투자율은 1.05로 공기의 1과 거의 같으며, 상대적으로 비투자율이 큰 철심으로 대체를 한 후 자기회로를 효율적으로 설계를 한다면 자석 사용량을 저감함과 동시에 동일한 출력을 얻을 수 있다. 그림 2의 (a)는 일반적인 IPMSM의 자속선을 나타낸다.

표 2는 IPMSM 기본모델에서 N극을 철심으로 대체한 모델 CP type IPMSM (PM 50% 모델)과 기본 모델의 해석 결과를 비교하여 나타내었다. 사용량 50[%]로 저감한 모델의 출력은

439.8[W]로 IPMSM의 600[W]에 대비하여 약 73.3[%]의 성능을 확인하였다. 자석 사용량을 줄여 자속 밀도가 낮아져 철손은 IPMSM에 비해 낮게 나왔으나, 출력 또한 감소하여, CP type의 효율은 86.3[%]로 IPMSM의 효율보다 2.6[%] 낮은 결과를 얻었다.



(a) Conventional IPMSM



(b) Consequent Pole(CP) type IPMSM

그림 2 자기회로의 비교

Fig. 2 Comparison of magnetic circuit

표 2 기본모델과 CP type IPMSM의 특성비교

Table 2 A comparison of characteristics between basic model and CP type IPMSM

Items	IPMSM model	PM 50% model
자석 사용 단면적 [mm ²]	396.8	198.4
역기전력 [Vrms]	8.26	6.34
코깁토크 [mNm]	299.2	222.1
인가전류 [Arms]	25	25
정격 속도 [rpm]	3,000	3,000
구동 토크 [Nm]	1.91	1.40
토크 리플 [%]	15.8	33.1
동손 [W]	28.99	28.99
철손 [W]	28.93	23.76
기계손 [W]	17.15	17.15
총 손실 [W]	75.07	69.9
출력 [W]	600	439.8
효율 [%]	88.9	86.3

2.2.1 자석 크기

600[W]급 출력을 맞추기 위해 영구자석(PM)의 크기 변화에 따른 특성 비교를 실시하였다. 크기에 따른 변수는 그림 3와 같이 자석의 두께와 폭으로 정하였다.

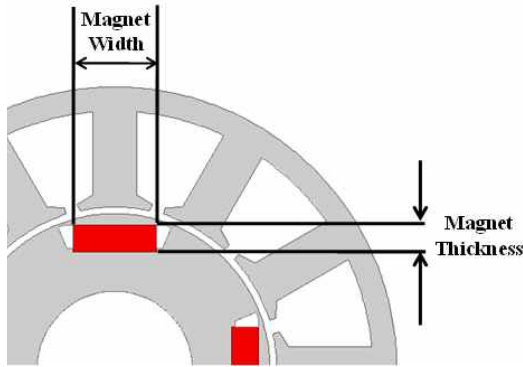


그림 3 영구자석 크기 설계변수
Fig. 3 A design parameter of permanent magnet size

기본모델의 영구 자석 크기는 두께와 폭이 각각 4[mm], 12.4[mm]이다. 자석의 두께를 4.5[mm]에서 6.0[mm]까지 0.5 [mm] 단위로 증가시켜 변화들을 확인하였다. 자석의 폭은 영구 자석 사용 저감률을 35[%]이상 목표로 하였으며, 면적을 이용하여 계산하면 영구자석 두께 변화에 따른 폭의 제한치를 계산할 수 있다. 이를 바탕으로 영구자석 두께에 따른 폭의 최대치에 대해 해석을 수행하였고, 이를 표 3에 나타내었다.

표 3 영구자석 크기에 따른 특성 (6turn)
Table 3 A Characteristics according to permanent magnet size (6turn)

	PM두께 [mm]	PM폭 [mm]	역기전력 [Vrms]	토크 [Nm]	PM저감률 [%]
Basic	4	12.4	8.26	1.91	-
PM 50%	4	12.4	6.34	1.41	50.0
Model 1	4.5	14.0	7.14	1.58	36.5
Model 2	5	12.8	6.80	1.50	35.5
Model 3	5.5	11.6	6.31	1.39	35.7
Model 4	6	10.6	5.80	1.27	35.9

표 3에서 최적의 모델을 정하면 영구자석 모델 1로 기본모델 대비 82.7[%]의 출력을 얻을 수 있다. 기본모델의 출력을 목표로 권선 사양을 변경하였다. 기본모델의 경우 접적율 41[%]로서, 변경모델 또한 41[%]를 유지하며, 기존 6턴에서 7턴으로 증가시켰다. 이를 표4에 정리하였다.

표 4에서 모델 1은 1.87[Nm]로 587.5[W]로 600[W]에 거의 근접하였다. 보다 높은 출력을 위해 영구자석을 분할하여 V 형태

표 4 영구자석 크기에 따른 특성 (7turn)
Table 4 A Characteristics according to permanent magnet size (7turn)

	PM두께 [mm]	PM폭 [mm]	역기전력 [Vrms]	토크 [Nm]	PM저감률 [%]
Basic	4	12.4	8.26	1.91	-
PM 50%	4	12.4	6.34	1.41	50.0
Model 1	4.5	14.0	8.33	1.87	36.5
Model 2	5	12.8	7.92	1.76	35.5
Model 3	5.5	11.6	7.34	1.63	35.7
Model 4	6	10.6	6.75	1.49	35.9

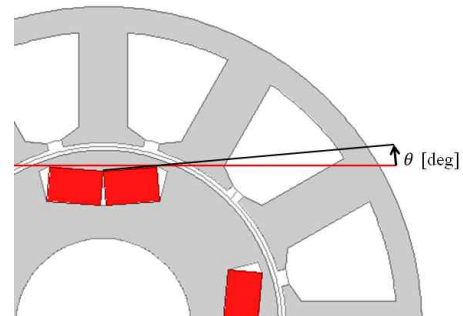


그림 4 V-type 모델 설계 변수
Fig. 4 A design parameter of V-type model

로 설계를 진행하였다.

2.2.2 V-type 영구자석

IPMSM은 매입형 전동기로 회전자 자석의 위치구조에 따라 자속 집중방식으로 한 경우 전동기의 출력 및 효율 등의 특성을 보다 향상시킬 수 있다[7]. 즉, 공극자속이 정현적으로 분포할 경우 구동 특성이 향상될 수 있다. 따라서 IPMSM의 영구자석을 분할하여 V-type 형상으로 함으로서 d축 방향으로 자속을 집중시키는 설계를 수행하였다. 이러한 모델을 편의상 V-type으로 지칭하고 설계변수 θ 를 그림 4에 나타내었다.

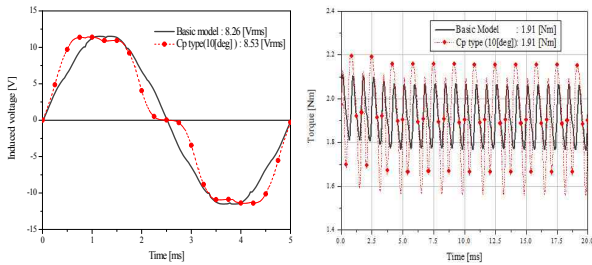
표 5에서 자석의 각도에 따른 특성을 확인할 수 있다. 2[deg] 이후 자석의 각도가 커질수록, 역기전력, 토크가 증가함을 알 수 있다. 자석의 각도가 10[deg] 일 때, 목표 출력에 도달하여 이 모델을 선정하였고, 특성을 그림 5에 나타내었다. 부하해석인 토크의 경우 상역기전력과 상전류를 동일한 위상으로 하여 전류원 해석을 실시하였다.

역기전력의 경우 8.53[Vrms]로 기본모델 보다 2.7[Vrms] 높은 값을 얻었으나, 파형이 왜곡된 형태임을 알 수 있다. 토크의 경우 평균값은 같으나, 토크 리플이 기본모델의 2배 이상인 31.5 [%]로 확인 되었다. 토크 리플을 줄이기 위한 설계를 하기위해 회전자 Arc적용을 진행하였다.

표 5 V-type 영구자석 각도에 따른 특성

Table 5 A characteristics according to V-type permanent magnet angle

θ [deg]	역기전력 [Vrms]	코깅토크 [mNm]	토크 [Nm]	출력 [W]
0	8.33	449.7	1.87	587.5
2	8.30	449.7	1.85	581.2
4	8.34	455.4	1.86	584.3
6	8.39	457.9	1.88	590.6
8	8.44	457.9	1.89	593.8
10	8.49	459.2	1.91	600.0
12	8.53	454.3	1.92	603.2
14	8.58	449.9	1.93	606.3



(a) 역기전력

(b) 코깅토크

그림 5 V-type 선정 모델의 특성

Fig. 5 A characteristics of selected V-type model

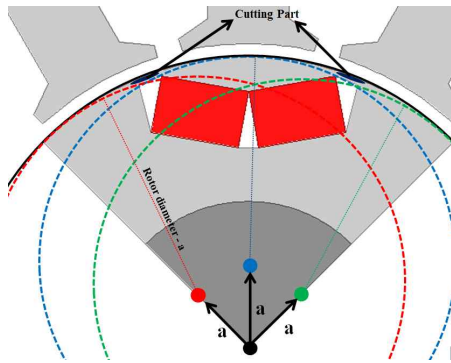


그림 6 회전자 Arc 설계변수

Fig. 6 A design parameter of rotor arc

2.2.3 Arc 적용

Arc는 전동기의 d축과 q축의 자기저항의 차이를 조절하여 코깅토크와 토크리플을 저감함은 물론 가진력의 특정 고조파 성분을 저감할 수 있는 설계 기법이다[6]. 회전자에 Arc를 적용하였으며 Arc 설계변수 a [mm]를 그림 6에 나타내었다. 회전자의 중심에서 a [mm]거리를 45[deg]마다 새로운 중심으로 하여 회전자 외경에서 a [mm]를 뺀 원을 그린 후 교집합 부분을 회전자로 선

표 6 회전자 Arc 설계 변수에 따른

Table 6 A characteristics according to Arc parameter of rotor arc

a [mm]	역기전력 [Vrms]	코깅토크 [mNm]	토크 [Nm]	토크리플 [%]
0	8.49	459.2	1.91	31.5
1	8.48	410.5	1.91	28.8
2	8.43	367.2	1.91	26.6
3	8.37	326.2	1.90	24.6
4	8.31	286.5	1.90	22.6
5	8.25	248.0	1.88	20.7

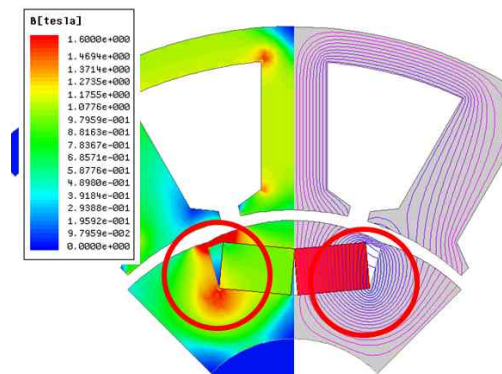


그림 7 제안 모델의 자속선과 자속밀도 분포도

Fig. 7 The flux line and magnetic flux density distribution of the proposed model

택하였다. 따라서 그림 6에서 잘려나가는 부분(Cutting part)을 확인할 수 있다. 이 때 잘리는 부분이 배리어 부분과 겹칠 경우도 발생하므로 Bridge를 0.5[mm]로 유지할 수 있게 영구자석과 배리어 위치를 변수에 따라 조정하였다.

표 6은 회전자 Arc 설계 변수에 따른 특성이다. Arc는 유효공극을 크게하는 설계 요소로, 자기 저항이 증가하여 구동 특성 저하의 원인이 될 수 있다. 하지만 위의 결과에서 알 수 있듯이 Arc 변수 5[mm]에서 토크리플은 20.7[%]로 초기 31.5[%]에서 10[%] 이상의 리플 저감을 확인하였다. Arc 설계로 인해 구동 특성이 1.88[Nm]로 저하되어 자속선과 자속밀도분포에서 원인을 확인하고 다음 절에서 배리어(Barrier) 설계를 통한 토크 증가 설계를 진행하였다.

2.2.4 배리어(Barrier) 설계

그림 7은 Arc 설계에서 제안한 모델($a=5$ [mm])에 대한 자속선과 자속밀도 분포도 이다. 표시된 영역(Bridge 영역)에서 볼 수 있듯이 누설자속의 영향이 굉장히 크게 나타난다. 이러한 영향을 보완하기 위해 배리어 형상 설계를 진행하였다. 변수 설정은 그림 8과 같다. 초기 각도 25[deg]에서 40[deg]까지 5[deg] 단위로 특성을 계산하였다

표 7 회전자 Barrier 설계 변수에 따른

Table 7 A characteristics according to Arc parameter of rotor barrier

β [deg]	역기전력 [Vrms]	코깅토크 [mNm]	토크 [Nm]	토크리플 [%]
25	8.25	248.0	1.88	20.7
30	8.30	246.9	1.90	20.0
35	8.37	246.0	1.92	19.3
40	8.41	244.9	1.93	18.7
45	8.45	243.8	1.94	18.1
50	8.47	242.8	1.95	17.3

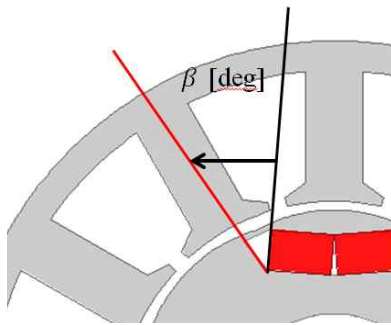


그림 8 배리어(Barrier) 설계 변수

Fig. 8 A design parameter of barrier

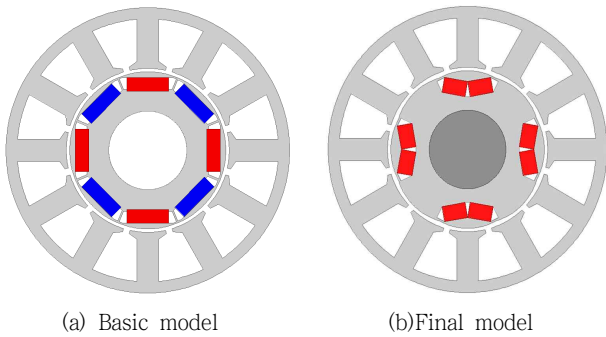


그림 9 기본모델과 최종 모델 형상

Fig. 9 The shape of basic model and final model

표 7은 배리어 변수에 따른 특성이다. 각도가 점차 커짐에 따라 구동 특성이 향상되는 것을 알 수 있다. 앞서 말한 누설자속이 배리어 변수에 따라 감소한 것으로 사료된다.

모델 선정에 앞서, 정격전압은 24[Vrms]이고, 정격속도 3000[rpm]이기 때문에, 역기전력의 제한을 8.4[Vrms] 미만으로 설정하였다. 따라서 최종 모델을 $\beta=35$ [mm]으로 선정하였고 형상은 그림 9에 기본모델과 나타내었다.

그림 10은 기본모델과 최종 모델의 무부하 특성을, 그림 11은 부하 특성을 나타낸다.

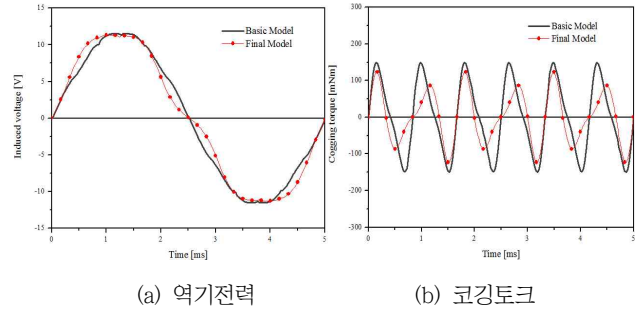


그림 10 기본모델과 최종모델의 무부하 특성 비교

Fig. 10 No-load characteristics comparison between basic model and final model

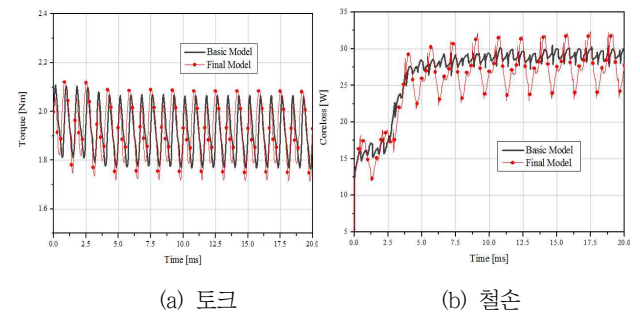


그림 11 기본모델과 최종모델의 부하 특성 비교

Fig. 11 Load characteristics comparison between basic model and final mode

표 8 기본모델과 CP type IPMSM의 특성비교

Table 8 A comparison of characteristics between basic model and final model

Items	IPMSM model	Final model
자석 사용 단면적 [mm ²]	396.8	252.0
역기전력 [Vrms]	8.26	8.37
코깅토크 [mNm]	299.2	246.0
인가전류 [Arms]	25	25
정격 속도 [rpm]	3,000	3,000
구동 토크 [Nm]	1.91	1.92
토크 리플 [%]	15.8	19.3
동손 [W]	28.99	36.92
철손 [W]	28.93	27.88
기계손 [W]	17.15	17.15
총 손실 [W]	75.07	81.95
출력 [W]	600.0	603.2
효율 [%]	88.9	88.0

최종적으로 표 8에 정리하여 나타내었다. 최종모델의 영구자석 단면적은 252.0[mm²]으로, 기본모델 IPMSM의 경우 396.8[mm²]으로 자석사용량 144.8[mm²]을 저감하고 동일 출력을 얻음을 확인 할 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 기본모델 IPMSM의 N극 또는 S극, 한 극성을 제거한 CP type IPMSM 모델을 제안하고 이를 비교 및 고찰하였다. 목표 출력에 도달하기 위해 영구자석 크기 변화에 따른 특성을 비교하고 분할 자석을 설계하였다. 목표한 출력에 도달하였으나, 토크리플이 매우 크게 발생하였다. 이에 따라 회전자에 Arc 적용을 하여 토크 리플을 저감하였다. 그러나 Arc 적용으로 인해 공극을 크게 하고, 자기저항이 증가하여 출력이 감소하게 되었다. 이를 보완하기 위해 배리어 설계를 통한 토크 증가 설계를 진행하였다. 이러한 과정을 거쳐 최종모델을 선정하였고, 자석 사용량 36.5[%]를 저감하면서 동일한 출력을 얻음을 알 수 있었다. 목표 출력을 도달하기 위해 점적율 41[%]를 유지하면서 권선사양을 변경하여 6턴에서 7턴으로 증가로 인해 저항의 증가로 동손이 증가하여 전체적인 효율은 기본모델 대비 0.8[%] 작음을 확인하였다. 추후 논문에 최종모델을 제작하여 실험을 통한 비교를 진행할 예정이다.

References

- [1] Ishii S, Hasegawa Y, Nakamura K, Ichinokura O, "Characteristics of novel flux barrier type outer rotor IPM motor with rare-earth and ferrite magnets", *2012 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, pp. 1-4, 2012.
- [2] Dong-Hee Lee, Kyung-Soo Cha, Jin-Chul Park, Jung-Pyo Hong, "Analysis of Vehicle System Efficiency Corresponding to Driving Cycle of Wound Field Synchronous Motor and Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle", *The Korean Society of Automotive Engineers*, 2017.5, 1112-1115 (4 pages)
- [3] Young-Soo Park, Jin-Hyung Yoo, Tae-Uk Jung, "PMA SynRM type rotor shape optimization design for reducing the permanent magnet usage and improving efficiency", *Proceedings of KIIEE Annual Conference*, 2016.5, 190-190 (1 pages)
- [4] S. U. Chung, J. M. Kim, D. H. Koo, B. C.Woo, D. K Hong, and J. Y. Lee, "Fractional slot concentrated winding permanent magnet synchronous machine with consequent pole rotor for low speed direct drive," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 11, pp. 2965-2968, Nov. 2012. [2] F.N. Najm, "A Survey of Power Estimation Techniques in VLSI Circuits," *IEEE Trans. on VLSI Systems*, pp. 446-455, Dec. 1994.
- [5] N. Watanabe H. Sugimoto A. Chiba T. Fukao M. Takemoto "Basic characteristic of the multi-consequent-pole bearingless motor", *Proc. Power Convers. Conf.-Nagoya 2007. PCC'07*, pp. 1565-1570.
- [6] D. Li, R. Qu, J. Li, W. Xu, "Consequent pole toroidal winding outer rotor vernier permanent magnet machines", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 6, pp. 4470-4481, Nov./Dec. 2015.
- [7] Heewoon Kim, Jongjun Bae, Jaeduk Jang, Insik Joo, "Reduction Method of Cogging Torque for EV/HEVAir Conditioner CompressorMotor" *The Korean Society of Automotive Engineers*, 2011.5, 1212-1216 (5 pages).

저 자 소 개



김 규 화 (Gyu-Hwa Gim)

1991년 4월 11일생. 2016년 창원대학교 공대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 055-213-3640

Fax : 055-213-9956

E-Mail : kkh4127@naver.com



박 병 준 (Byung-Jun Park)

1969년 5월 8일생. 1989년~2001년 삼성테크윈 근무, 2016년 창원대학교 공대 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 2017년~현재 박병준전기연구소 대표.

Tel : 055-213-3640

Fax : 055-213-9956

E-Mail : dpbj1398@hanmail.net



김 용 태 (Yong-Tae Kim)

1987년 1월 24일생. 2012년 창원대학교 공대 전기공학과 졸업. 2014년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 S&T모티브(주) 근무.

Tel : 055-213-3640

Fax : 055-263-9956

E-mail : yongtae.kim@sntmotiv.com



김 규 탁(Gyu-Tak Kim)

1961년 11월 12일생. 1982년 한양대학교 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 창원대학교 공대 전기공학과 교수.

Tel : 055-213-3635

Fax : 055-263-9956

E-mail : gtkim@changwon.ac.kr